

## Skoki narciarskie

Sukcesy odnoszone przez naszych skoczków narciarskich sprzyjają zainteresowaniu tą dyscypliną sportu. Ale oprócz dostarczania sportowych emocji, skoki narciarskie mogą też służyć do zgłębiania różnych zagadnień z mechaniki, bowiem ruch skoczka jest bardzo ciekawy. Zawodnik początkowo ześlizguje się po śniegu lub igelicie, następnie wybija się z progu skoczni, po czym unosi się w powietrzu, a na koniec musi w bezpieczny sposób wylądować.

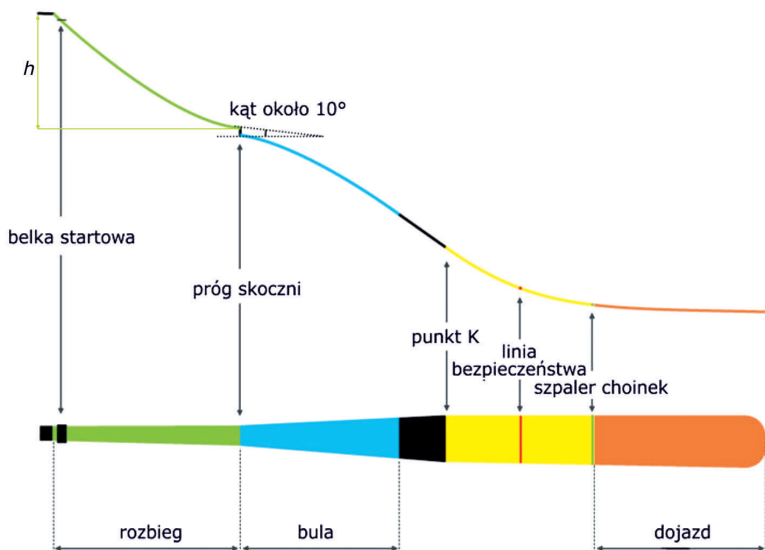
Celem skoku jest uzyskanie jak najdłuższej odległości od progu skoczni, z zachowaniem odpowiedniego stylu lotu i lądowania. Punkty otrzymuje się w zależności od miejsca wylądowania względem tzw. punktu K, położonego w najbardziej stromym miejscu stoku. Punkt ten oznaczony jest czerwoną linią prostopadłą do osi skoczni. Za każdy dodatkowy metr poza linię K zawodnikowi dodaje się punkty, a za każdy brakujący – odejmuje się je. Na najmniejszych skoczniach punkt K położony jest w odległości mniejszej niż 45 m od progu. Natomiast w przypadku tzw. skoczni mamucich, odległość punktu K od progu przekracza 170 m.

Każdy z etapów ruchu skoczka wymaga odpowiedniego sterowania ułożeniem ciała tak, aby w konsekwencji oddać jak najdłuższy skok.

W fazie rozbiegu chodzi o to, żeby osiągnąć jak największą prędkość na progu skoczni. W zależności od prędkości i kierunku wiatru organizatorzy zawodów mogą sterować ustawieniem belki startowej tak, aby zoptymalizować długość skoku. Z jednej strony chodzi o to, aby skoczkowie mogli latać daleko, ale jednocześnie należy im zapewnić możliwość bezpiecznego lądowania przed tzw. linią bezpieczeństwa. Im wyżej położona jest belka startowa, tym większa jest początkowa energia potencjalna grawitacji skoczka względem poziomu progu, zgodnie ze wzorem:  $E_p = mgh$  ( $m$  oznacza masę zawodnika,  $h$  odpowiada wysokości środka ciężkości skoczka nad progiem, a  $g = 9,81 \text{ m/s}^2$  to wartość przyspieszenia ziemskiego). Podczas zjazdu energia potencjalna stopniowo maleje, ponieważ zmniejsza się wysokość środka ciężkości skoczka ponad progiem. Rośnie natomiast energia kinetyczna:  $E_k = \frac{1}{2}mv^2$  (gdzie  $v$  oznacza wartość prędkości zawodnika). Gdyby energia potencjalna była całkowicie zamieniana na energię kinetyczną, to prędkość skoczka przy wyjściu z progu miałaby wartość  $v = \sqrt{2gh}$ . Jeśli przyjmiemy wysokość belki nad progiem równą około 50 m, to zawodnik wychodziłby z progu z prędkością o wartości około 31 m/s, czyli około 113 km/h. W rzeczywistości prędkość mierzona na progu ma wartość około 25 m/s, czyli 90 km/h. Za to zmniejszenie prędkości odpowiedzialny jest głównie opór powietrza i, w mniejszym stopniu, tarcie pomiędzy nartami a podłożem. Wartość siły oporu powietrza rośnie proporcjonalnie do kwadratu szybkości. Oznacza to, że im szybciej porusza się skoczek, tym mocniej doświadcza on siły hamującej powietrza. Siła oporu powietrza jest również tym większa, im większa jest powierzchnia ciała skoczka prostopadła do kierunku ruchu. Zawodnicy starają się więc przyjąć taką pozycję, w której powierzchnia ta jest jak najmniejsza, pochylając się w głębokim przysiadzie i wyciągając ramiona do tyłu. Gładka powierzchnia kasku i kombinezonu dodatkowo



zmniejsza siły oporu. Natomiast tarcie pomiędzy nartami i podłożem można zmniejszyć ostrząc krawędzie i smarując narty woskiem (istnieją różne rodzaje wosków odpowiednio dobrane do różnych typów śniegu i temperatury).

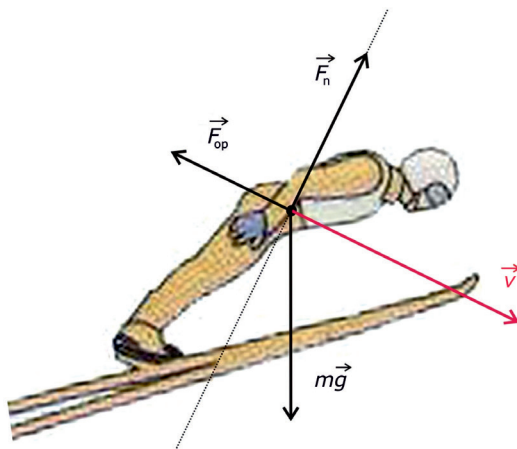


Rys. 1. Kształt skoczni narciarskiej (źródło: Wikimedia)

Końcowy fragment rozbiegu ma kształt łuku okręgu o promieniu około 90 m, po czym stok wypłaszcza się tuż przed progiem. Ten płaski fragment jest nachylony lekko ku dołowi, pod kątem od około  $10^\circ$ . Jego długość jest tak dobrana, żeby skoczek pokonywał go w czasie około 0,25 sekundy. Dlatego tak istotna jest prawidłowa synchronizacja zmian postawy zawodnika w fazie wychodzenia z progu. Skoczek musi zmienić pozycję ciała, wyprostowując nogi w kolanach i układając ciało niemal równoległe do nart. Wymaga to dużej siły i dobrej koordynacji. Nawet drobna różnica w sile wypchnięcia z lewej i prawej nogi może w znaczący sposób wpłynąć na równowagę w czasie wyjścia z progu, co przekłada się następnie na stabilność lotu. Wyprostowanie się skoczka powoduje zwiększenie jego energii kinetycznej, dzięki czemu wartość jego prędkości wzrasta o około 2,5 m/s. Ten proces można porównać do gwałtownego wydłużenia ściśniętej sprężyny po usunięciu działającej na nią siły ściskającej. W czasie wyprostowywania się energia mechaniczna zgromadzona w mięśniach pochylonego w przysiadzie zawodnika ulega przekształceniu w energię kinetyczną oraz w energię potencjalną (ponieważ wysokość środka ciężkości skoczka nad progiem wzrasta). Jeśli synchronizacja ruchów zawodnika była prawidłowa, to po wyjściu z progu jego prędkość jest optymalna, czyli skierowana prawie poziomo lub lekko ku górze.

Kolejna faza ruchu zawodnika to lot nad bulą, czyli częścią stoku znajdującą się bezpośrednio za progiem. Kształt buły jest tak zaprojektowany, żeby skoczek w czasie lotu znajdował się przez cały czas „zaledwie” około 6 m nad powierzchnią stoku. Długość skoku zależy przede wszystkim od prędkości początkowej oraz od pozycji zawodnika w czasie lotu. Po wyjściu z progu na skoczka działają trzy siły:

- siła ciężkości (zwrócona pionowo ku dołowi)
- oraz siły aerodynamiczne:
- siła oporu powietrza (równoległa do kierunku ruchu i zwrócona w przeciwną stronę),
  - siła nośna (prostopadła do kierunku ruchu).



Rys. 2. Siły działające na skoczka w trakcie lotu

$\vec{v}$  – wektor prędkości skoczka,  $m\vec{g}$  – siła ciężkości,  $\vec{F}_{op}$  – siła oporu powietrza,  $\vec{F}_n$  – siła nośna

Siła ciężkości przyczynia się do skracania długości lotu. W czasie zjazdu składowa siła ciężkości prostopadła do podłoża jest równoważona przez siłę reakcji podłoża, a zawodnik pozostaje w kontakcie z powierzchnią skoczni. W fazie lotu siła reakcji podłoża znika i cała siła ciężkości powoduje ruch przyspieszony skoczka pionowo w dół z przyspieszeniem ziemskim wynoszącym  $9,81 \text{ m/s}^2$ . Oznacza to, że gdyby na zawodnika nie działała żadna inna siła, to w każdej kolejnej sekundzie lotu składowa prędkości skierowana w dół wzrastałaby o  $9,81 \text{ m/s}$ . Załóżmy, że po wyjściu z progu prędkość skoczka jest skierowana idealnie poziomo i ma wartość  $25 \text{ m/s}$ . Znaczący to, że składowa pionowa prędkości ma wartość zero, natomiast składowa pozioma ma wartość  $25 \text{ m/s}$ . Jeśli pominęlibyśmy wszystkie siły oprócz siły ciężkości, to po pierwszej sekundzie lotu skoczek poruszałby się pionowo w dół z szybkością  $9,81 \text{ m/s}$  i poziomo ze stałą szybkością  $25 \text{ m/s}$ . Po drugiej sekundzie lotu, składowa pozioma nie uległaby zmianie, natomiast składowa pionowa wzrosłaby do  $19,62 \text{ m/s}$ , itd.

W rzeczywistości, na skutek oporu powietrza, pozioma składowa prędkości zawodnika stopniowo maleje, a składowa pionowa nie wzrasta co sekundę o  $9,81 \text{ m/s}$ , lecz wolniej. Spróbujmy wyjaśnić, dlaczego tak się dzieje i jaki ma to wpływ na długość skoku. W tym celu wygodnie będzie nam rozważyć ruch skoczka w dwóch kierunkach: pionowym i poziomym. Ponieważ, jak już wiemy, opór powietrza jest tym większy im większa jest powierzchnia prostopadła do kierunku ruchu, zawodnik może wpływać na wartość tej siły zmieniając pozycję ciała. W początkowej fazie lotu chodzi głównie o zachowanie prędkości osiągniętej na progu. Aby ją utrzymać, zawodnik przysuwa ciało blisko nart i porusza się stylem klasycznym, z nartami ustawionymi równolegle. W kierunku poziomym na powierzchnię prostopadłą do kierunku ruchu składa się wówczas przede wszystkim

kim powierzchnia kasku i barków zawodnika oraz czubki nart. Dzięki temu opór powietrza w kierunku poziomym jest minimalny. Jednocześnie w kierunku pionowym powierzchnia skoczka prostopadła do kierunku ruchu jest bardzo duża, co sprawia, że spada on wolniej niż gdyby działała na niego tylko siła ciężkości. Ponieważ siła oporu jest proporcjonalna do kwadratu szybkości, przyspieszenie skoczka w dół jest coraz mniejsze. W ten sposób siła oporu powietrza działająca w kierunku pionowym przyczynia się do wydłużenia czasu lotu i tym samym – długości skoku.

Pora wreszcie powiedzieć coś na temat drugiej z sił aerodynamicznych: siły nośnej. Weźmy jako przykład obiekt poruszający się poziomo. W zależności od jego kształtu siła nośna może być zwrócona ku górze (siła działająca na skrzydło samolotu) lub ku dołowi (siłą działającą na „skrzydełka” samochodów wyścigowych dociskająca samochód do jezdni). W przypadku skoków narciarskich, pozycja przyjmowana przez zawodnika zapewnia mu siłę nośną skierowaną ku górze i lekko do przodu. Wartość tej siły, podobnie jak wartość siły oporu, jest wprost proporcjonalna do kwadratu wartości prędkości. To dlatego tak istotne jest, aby zawodnik wybił się z progu z dużą szybkością. Wartość siły nośnej jest również proporcjonalna do powierzchni równoległej do kierunku ruchu. Składowa siły nośnej działająca pionowo ku górze zależy więc od wielkości powierzchni skoczka rzutowanej na oś poziomą. Kiedy więc w początkowej fazie lotu zawodnik przyjmuje pozycję niemalże horyzontalną, sprzyja to nie tylko zmniejszeniu oporu powietrza, ale także zwiększa składową siły nośnej działającą ku górze. Składowa siły nośnej działająca poziomo zależy z kolei od powierzchni rzutowanej na oś pionową. Aby jak najlepiej wykorzystać siłę nośną, w drugiej fazie lotu, zawodnik unosi się nieco, oddala ramiona od ciała i ustawia narty w kształt litery V. Służy to zwiększeniu powierzchni nośnej zarówno w kierunku poziomym jak i pionowym, i tym samym poprawia długość skoku.



Rys. 3. Zawodnik w drugiej fazie lotu z nartami ułożonymi w kształt litery V  
(źródło: Wikimedia)

Ponieważ powierzchnia zawodnika i nart ma tak wielki wpływ na wartości sił aerodynamicznych, regulamin skoków narciarskich bardzo precyzyjnie określa długość i szerokość nart, oraz rozmiar i materiał z jakiego wykonane mogą być kombinezony zawodników. Maksymalna dozwolona długość nart określana jest w zależności od wzrostu i wagi zawodnika, a kombinezon musi dobrze przylegać do ciała i pozwalać na swobodny przepływ powietrza.

Ostatnią fazą skoku jest lądowanie. Aby zamortyzować uderzenie o nawierzchnię i utrzymać równowagę, zawodnik przyjmuje charakterystyczną pozycję zwaną wypadem lub telemarkiem. Skoczek pochyla się lekko do przodu, wyciągając ramiona na boki i uginając nogi w kolanach. Jedna noga wysunięta jest nieco do przodu tak, aby podudzie było ustawione prostopadłe do podłoża. Natomiast narty powinny być ułożone jak najbardziej równoległe do siebie i tak, aby odległość między nimi nie była zbyt duża. Podobnie jak przy wyjściu z progu, zmiana pozycji ciała przy przejściu z fazy lotu do fazy lądowania wymaga bardzo dobrej synchronizacji ruchów. A w momencie, kiedy narty dotykają podłoża, zawodnik musi być przygotowany na szybkie skompensowanie wszelkich niedokładności w ustawieniu ciała, żeby uniknąć upadku.



Rys. 4. Lądowanie z telemarkiem (źródło: Wikimedia)

Obserwując loty skoczków możemy podziwiać w jak spektakularny sposób zawodnicy wykorzystują prawa fizyki, by zachwycać nas, widzów, imponując długimi skokami. Mam nadzieję, że zachęciłam Cię, drogi Czytelniku do jeszcze bardziej uważnego przyglądania się zawodnikom na skoczni podczas następnej transmisji z zawodów. Może obserwując pozycję skoczka przy wyjściu z progu i podczas lotu uda Ci się przewidzieć, jak daleki będzie jego skok?